

Optimización del diseño de talud en minería superficial mediante el método de elementos finitos

Optimization of the slope design in surface mining using the finite element method

Pamela Patricia Catari Colque¹, Christ Jesus Barriga Paria¹, Carmen Rosa Villanueva Ari¹, Juan Mauricio Gomez Velasquez¹, Helaman Luis Alvarado Ramirez¹, Dalila Rosmeri Melgar Raymundo¹, Emily Adriana Chirinos Quintanilla¹

¹Universidad Nacional de Moquegua, Moquegua, Perú, 18001;

2016103053@unam.edu.pe; cbarrigap@unam.edu.pe; 2020103032@unam.edu.pe; 2020103067@unam.edu.pe;

2021103031@unam.edu.pe; 2020103078@unam.edu.pe

*Correspondencia: 2020103023@unam.edu.pe

Citación: Catari, P.; Barriga, C.; Villanueva, C.; Gomez, J.; Alvarado, H.; Melgar, D. & Chirinos, E., (2025). Optimización del diseño de talud en minería superficial mediante el método de elementos finitos. *Novasinerugia*. 8(1). 33-51.

<https://doi.org/10.37135/ns.01.15.09>

Recibido: 09 octubre 2024

Aceptado: 05 noviembre 2024

Publicado: 08 enero 2025

Novasinerugia

ISSN: 2631-2654

Resumen: El objetivo de este estudio es desarrollar un diseño final para el Talud Noroeste de la Mina Cuajone (Perú) utilizando el cálculo del factor de seguridad (FS) mediante métodos de elementos finitos, planteando que este método permite una evaluación más precisa de la estabilidad del talud. La metodología incluyó la caracterización geológica y geotécnica del talud mediante mapeo de campo, análisis de muestras y pruebas de laboratorio. Se creó un modelo tridimensional usando el software Phase2 para simular la interacción entre la geometría del talud y las condiciones operativas, realizando un análisis de estabilidad bajo diferentes cargas y perturbaciones. Los resultados indican que el método de elementos finitos proporciona una evaluación detallada del factor de seguridad y del ángulo interrampa (IRA). En la zona sur (sección A-A'), se determina que un IRA de 43° genera un FS de 1.1. En la zona norte (sección B-B'), se recomienda un IRA de 38° para lograr un FS de 1.57. Los hallazgos son fundamentales para garantizar la seguridad y eficiencia operativa en la mina, ya que un diseño de talud inadecuado podría comprometer la integridad de la infraestructura y la seguridad de los trabajadores. La aplicación de métodos avanzados como el análisis de elementos finitos y la consideración de factores como el IRA y el factor de perturbación permite una evaluación precisa de la estabilidad del talud y la implementación de medidas de estabilización efectivas para gestionar los riesgos y desarrollar soluciones de refuerzo específicas según la configuración geotécnica del talud.

Palabras clave: Elementos finitos, Estabilidad de taludes, Tajo abierto, Phase2, Seguridad operacional.

Abstract: This study aims to develop a final design for the Northwest Slope of the Cuajone Mine (Peru) by calculating the factor of safety (FS) using finite element methods, proposing that this method enables a more accurate assessment of slope stability. The methodology included geological and geotechnical characterization of the slope through field mapping, sample analysis, and laboratory testing. A three-dimensional model was created using Phase2 software to simulate the interaction between slope geometry and operational conditions, conducting a stability analysis under different loads and disturbances. The results indicate that the finite element method detailedly evaluated the safety factor and the inter-ramp angle (IRA). In the southern zone (section A-A'), it was determined that an IRA of 43° generates an FS of 1.1. In the northern zone (section B-B'), an IRA of 38° is recommended to achieve an FS of 1.57. These findings are essential for ensuring operational safety and efficiency at the mine, as an inadequate slope design could compromise infrastructure integrity and worker safety. Advanced methods, such as finite element analysis and considering factors like IRA and disturbance factors, allow for a precise slope stability assessment and effective stabilization measures to manage risks and develop specific reinforcement solutions according to the slope's geotechnical configuration.

Keywords: Finite elements, Slope stability, Open pit, Phase 2, Operational safety.



Copyright: 2025 derechos otorgados por los autores a Novasinerugia.

Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de una licencia de Creative Commons Attribution (CC BY NC).

(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

1. Introducción

La estabilidad de taludes en minas a cielo abierto es una preocupación crítica para la seguridad, la eficiencia operativa y la viabilidad económica de las operaciones mineras. A lo largo de los años, diversos métodos fueron desarrollados y aplicados para evaluar y garantizar la estabilidad de estos taludes. Entre ellos, el método de equilibrio límite ha sido ampliamente utilizado debido a su simplicidad y efectividad en diferentes contextos geotécnicos, como se demostró en el caso de la Mina de Oro Tanjianshan, donde se verificó la eficacia de este método para analizar taludes heterogéneos (Zhao et al., 2023). Sin embargo, este enfoque presentó limitaciones significativas al no considerar adecuadamente la complejidad geométrica y la heterogeneidad del terreno. En contraste, métodos más avanzados como el análisis del método de elementos finitos (MEF) han ganado popularidad por su capacidad de proporcionar una comprensión detallada del comportamiento de los taludes bajo diversas condiciones. Estudios mostraron que el MEF podía manejar la variabilidad en la geometría del talud y las propiedades del suelo, ofreciendo una evaluación más precisa del factor de seguridad y de las superficies de deslizamiento críticas (Ancuța et al., 2022). A pesar de esto, la aplicación de MEF no está exenta de desafíos, especialmente en términos de la necesidad de datos detallados y de una mayor capacidad computacional.

La optimización del ángulo de talud en minas a cielo abierto, integrando la seguridad, productividad y costos, ha sido abordada mediante enfoques híbridos que combinan modelado numérico con análisis probabilísticos. Este enfoque permitió una evaluación más equilibrada, pero reveló la dificultad de encontrar un compromiso óptimo entre estos factores, ya que aumentar la inclinación del talud puede mejorar la rentabilidad, pero compromete la estabilidad (Abdellah et al., 2022). Casos específicos como el talud sur de la Mina de Cobre Chengmenshan han demostrado la utilidad de combinar técnicas de equilibrio límite y métodos numéricos para abordar problemas de estabilidad en condiciones geotécnicas complejas. Este es un referente que nos indica que la implementación de métodos de refuerzo como el anclaje preesforzado y la inyección de lechada ha mejorado significativamente el factor de seguridad (Mnzool et al., 2013).

Por otro lado, la combinación de métodos avanzados como el análisis del método de elementos finitos conjuntos (MEFJ) y el análisis de deformación discontinua (ADD) permite una evaluación integral de taludes altamente fracturados, desde la identificación de la estabilidad hasta la optimización del diseño de soporte. Este enfoque holístico es esencial para gestionar los riesgos y desarrollar soluciones de refuerzo específicas según la configuración geotécnica del talud (Kang et al., 2022). Recientemente, la utilización de modelos tridimensionales de elementos finitos ha permitido superar las limitaciones de los modelos bidimensionales, proporcionando una comprensión más detallada de los mecanismos de inestabilidad en minas con condiciones geológicas anisotrópicas. Esta evolución en la modelización permite una evaluación más precisa y confiable de la estabilidad de taludes complejos (Bar et al., 2019). Además, el uso de análisis estadísticos difusos en la evaluación de la estabilidad de taludes aborda la incertidumbre inherente en los parámetros geotécnicos, mejorando la precisión de las evaluaciones de riesgo y la toma de decisiones técnicas. Este enfoque difuso permite considerar la variabilidad y la

incertidumbre de los parámetros geotécnicos, proporcionando una evaluación más robusta de la estabilidad del talud (Wang & Lin, 2021).

A pesar de los avances significativos en la evaluación de la estabilidad de taludes, persisten desafíos importantes. La mayoría de los estudios existentes se han centrado en condiciones específicas y no siempre abordan de manera integral la complejidad geotécnica y geométrica de los taludes. Además, las limitaciones en la disponibilidad de datos detallados y en la capacidad computacional restringen la aplicación de métodos más avanzados en algunos escenarios de investigación. El objetivo de este estudio es desarrollar un diseño final para el talud Noroeste de la Mina Cuajone, utilizando el cálculo del factor de seguridad mediante métodos de elementos finitos para proporcionar su estabilización. Se plantea la hipótesis de que la aplicación de métodos de elementos finitos permitirá una evaluación más precisa y detallada de la estabilidad del talud, considerando la complejidad geotécnica y geométrica del mismo, y proponiendo medidas de estabilización adecuadas para asegurar su seguridad a largo plazo.

2. Metodología

2.1. Ubicación geográfica

La población de estudio comprendió el Deslizamiento 53 (D53), ubicado en la Fase 07 en la totalidad del Tajo Cuajone, se explota a cielo abierto por la empresa Southern Perú Copper Corporation (SPCC), se ubica a unos 30.4 km del distrito de Torata. Las coordenadas geográficas de la mina Cuajone son: UTM WGS84 zona 19 sur; 317685E, 8117350N y 319515E, 8115815N (Gagliuffi & Vera, 2018), como se muestra en la Figura 1. Para abordar el estudio sobre la estabilidad del talud Noroeste en la mina Cuajone, se implementó un enfoque prospectivo observacional, utilizando una combinación de técnicas y herramientas para obtener una comprensión detallada de las condiciones geológicas y geotécnicas del área, así como para evaluar la estabilidad del talud bajo diferentes condiciones operativas y geológicas.

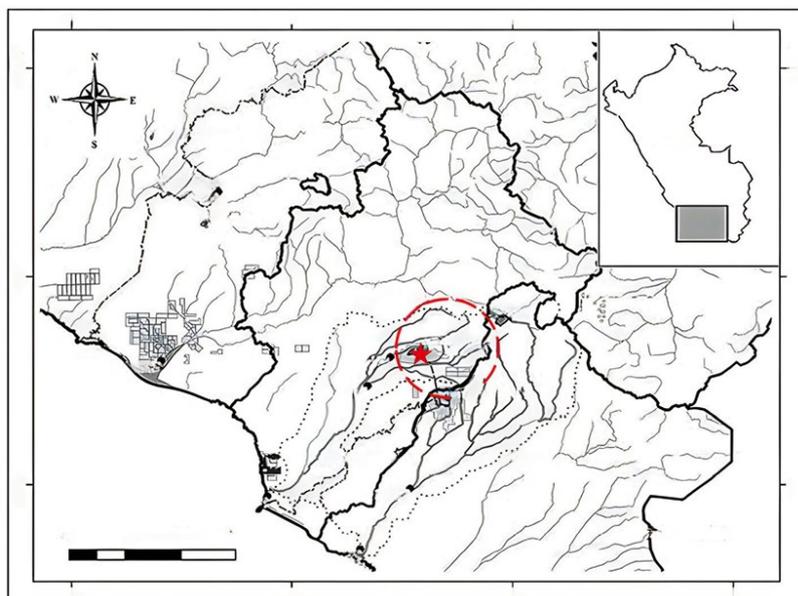


Figura 1: Ubicación geográfica de la unidad minera Cuajone

Se llevó a cabo una caracterización detallada del talud Noroeste mediante mapeo geológico de campo, registro de perforaciones, análisis de muestras de roca y pruebas de laboratorio geotécnicas, enfocándose en las discontinuidades geológicas para comprender la estructura y propiedades del macizo rocoso. Para el análisis de discontinuidades se empleó el software Dips V.7.0 (Rocscience Inc., 2012), el cual facilitó el estudio de la orientación y características estructurales del talud, permitiendo identificar zonas de debilidad y patrones de fractura críticos. Posteriormente, se generó un modelo tridimensional con el software Phase2 V.8.0 (Rocscience Inc., 2016), el cual simula la interacción entre la geometría del talud y las condiciones operativas, permitiendo el cálculo de factores de seguridad bajo diversas condiciones de carga y la consideración del factor de perturbación (D) por voladura. Este método de análisis con elementos finitos ha sido aplicado previamente en estudios de estabilidad de taludes en minas a cielo abierto y otros escenarios geotécnicos complejos, como en la Mina de Cobre Chengmenshan, donde se demostró su eficacia al combinarlo con el método de equilibrio límite para la optimización del diseño de taludes (Mnzool et al., 2013). Además, se implementaron estrategias de monitoreo continuo, lo cual ha optimizado tanto el diseño del talud como la seguridad y sostenibilidad operativa en Cuajone.

Para monitorear las condiciones del talud y validar los resultados del modelado numérico, se emplearon instrumentos geotécnicos como medidores de inclinación, piezómetros y extensómetros. Estos instrumentos proporcionaron datos cruciales para comprender el comportamiento del talud bajo diferentes cargas y condiciones operativas. Además, se recopiló información detallada sobre las actividades mineras en el área de estudio, incluyendo datos sobre voladuras, cargas de explosivos y otras actividades que pudieran influir en la estabilidad del talud. Se realizaron levantamientos topográficos precisos del área de estudio utilizando estaciones totales, GPS y drones, lo que permitió obtener datos sobre la geometría del talud y su evolución a lo largo del tiempo, en la Figura 2 se muestra a detalle el procedimiento de cómo se llevó a cabo las actividades desarrolladas en la presente investigación.

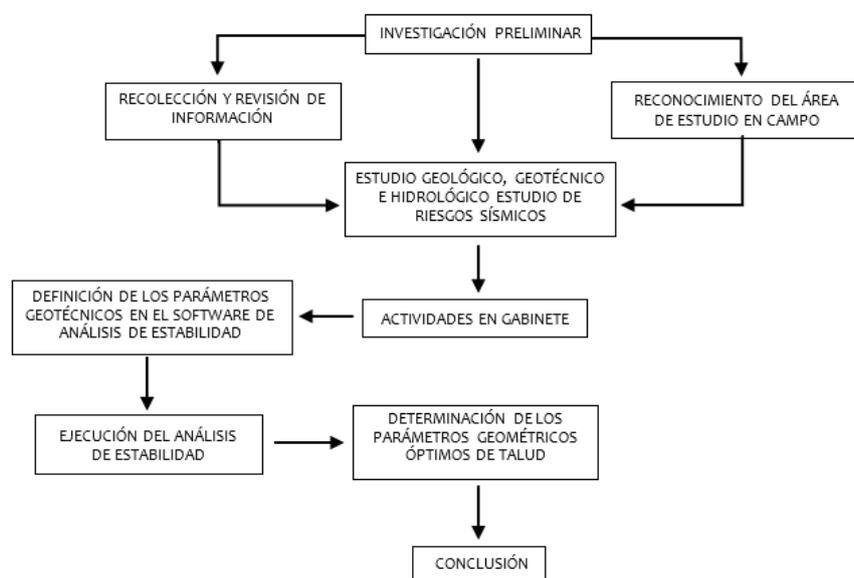


Figura 2: Diagrama de desarrollo de la investigación

2.2. *Geología local*

El Grupo Toquepala constituye la base geológica de la Mina Cuajone, con rocas que datan desde el Cretácico Superior hasta el Paleoceno, abarcando un rango temporal estimado entre 80 y 60 millones de años. Estas rocas, denominadas localmente como rocas pre-minerales, comprenden una variedad de tipos litológicos, destacándose principalmente la Andesita Basáltica, la Riolita Porfirítica, la Dolerita Toquepala y otras Rocas Intrusivas como la Diorita, Latita Porfirítica, Brechas Post-Minerales y Diques. Estas formaciones constituyen la columna vertebral geológica sobre la cual se asienta el complejo minero de Cuajone. El estudio detallado de estas rocas proporciona información crucial sobre la evolución geológica de la región, facilitando la comprensión de los procesos tectónicos y magmáticos que han modelado el área (Gagliuffi & Vera, 2018).

Posteriormente a los eventos de mineralización, se depositaron una serie de formaciones rocosas postminerales que son fundamentales en la geología local de la Mina Cuajone. Entre ellas, la Formación Huaylillas (Ts-vhu) se destaca por su presencia en la ladera sureste de la Quebrada Chuntacala y en la ladera norte del Río Torata. Esta formación está compuesta por una secuencia diversa de conglomerados, tobas, vitrófiros, traquitas y aglomerados, con espesores que pueden alcanzar hasta los 230 metros. Por otro lado, la Formación Chuntacala (Ts-ch), con una antigüedad estimada entre 9 y 14 millones de años (Mioceno), se encuentra ubicada entre los valles de Chuntacala y Torata. Presenta disconformidades que sugieren levantamientos episódicos en el área de la mina, lo que añade una capa adicional de complejidad a su historia geológica (Gagliuffi & Vera, 2018).

Dos estructuras geológicas destacadas en la geología local de la Mina Cuajone son la Falla Mayor Sur y la Falla Cuajone. La Falla Mayor Sur, con aproximadamente 950 metros de longitud, presenta una compleja red de ramales que se bifurcan y se unen, con un azimut preferencial de 212° y un buzamiento que oscila entre $45-55^\circ$ SO. Esta estructura es crítica para la estabilidad del terreno, ya que puede presentar problemas potenciales de estabilidad de taludes en el tajo minero. La Falla Cuajone, con un azimut de 335° y un ancho de 10-12 metros, ejerce un control significativo sobre la mineralización en la región, tal como se muestra en la Figura 3. Actualmente se están realizando mapeos para identificarla con mayor precisión y para interpretar su rol en el proceso de mineralización. Estas estructuras geológicas son fundamentales para entender la dinámica tectónica y la distribución de los minerales en la Mina Cuajone, proporcionando información esencial para las operaciones mineras y la gestión de riesgos geotécnicos.

para calcular posibles desplazamientos. Para ello, se utilizan modelos numéricos que resuelven las ecuaciones de elasticidad o plasticidad, proporcionando tensiones, deformaciones y desplazamientos en todo el modelo. Este tipo de análisis es especialmente relevante en taludes formados por material poco consolidado y en macizos rocosos con baja competencia, donde la ausencia de planos de discontinuidad evita la creación de superficies preferenciales de rotura. El método de deformaciones es aplicable principalmente en taludes rocosos profundos, donde pueden presentarse tensiones elevadas, plastificaciones y deformaciones significativas. Este método se subdivide en tres enfoques: elementos finitos, elementos discretos y elementos de borde. En esta investigación, se utilizará el método de elementos finitos (Jaeger et al., 2007).

2.3.1. Modelamiento numérico

El modelado numérico se centra principalmente en calcular esfuerzos, deformaciones y factores de estrés mediante cálculos numéricos basados en teorías previamente estudiadas u observadas. Su metodología básica implica la discretización de elementos, donde se divide un elemento continuo o de borde en fragmentos más pequeños, asignándoles las propiedades físicas del cuerpo al que pertenecen. Esto permitió observar el comportamiento individual de cada fragmento y luego extrapolarlo a un comportamiento general con todas las fracciones discretizadas. Aunque el modelado numérico fue una herramienta de análisis poderosa, requiere una amplia fuente de información y un diseño adecuado para el caso de estudio. Este enfoque de modelado requiere varios parámetros de entrada, que incluyen la geometría (2D y 3D), la geología (litología), los esfuerzos in situ, el tipo de modelo, las propiedades de los materiales y la aproximación numérica. Los métodos numéricos de análisis se pueden clasificar en diversas categorías, como se indica en la Tabla 1.

Tabla 1: Clasificación de los métodos numéricos de análisis

Método	Características	Utilización	Softwares
Elementos Finitos (MEF)	Se asume una malla de elementos con sus respectivos nodos y propiedades elastoplásticas de los materiales.	Se aplica a taludes que puedan considerarse como masas continuas sin bloques.	FLAC, Plaxis, Phase2
Elementos Distintos o Discreto (MED)	Se divide el talud en elementos con sus propiedades internas y de las uniones entre los elementos que se pueden mover libremente.	Se aplica para analizar inclinación de bloques.	FLAC
Elementos de Borde (MEB)	Se discretizan las áreas para poder modelar la ocurrencia de agrietamientos en el talud.	Se utiliza para estudiar problemas de propagación de grietas.	MAP 3D

2.3.2. Elementos finitos

El MEF, presentado por Clough y Woodward en 1967, implicó dividir la masa de suelo en unidades discretas conocidas como elementos finitos, que forman una malla con nodos y bordes predefinidos. Este método, ampliamente utilizado, se basa en una formulación de desplazamientos que proporciona resultados en términos de esfuerzos y

deformaciones en los puntos nodales (Suárez, 2009). Según (Cervera, 2022), la técnica de Elementos Finitos es un análisis esfuerzo-deformación que permite predecir la naturaleza y magnitud de los desplazamientos compatibles con el equilibrio del talud a medida que se desarrolla la actividad minera. Esto implica que la estabilidad de estos taludes dependerá tanto de la geometría del tajo como del estado de esfuerzos primarios. Los datos de entrada incluyen: Estado de esfuerzos primarios, Módulo de elasticidad, Parámetros de resistencia al corte (cohesión y ángulo de fricción), Resistencia compresiva, Disposición estructural y Geometría presente del Tajo.

El método de elementos finitos (MEF) discretiza las paredes del talud en mallas de elementos triangulares o rectangulares, con nodos interconectados que modelan los desplazamientos esperados. Cada elemento se considera homogéneo, y se utilizan programas computacionales para calcular desplazamientos en dos dimensiones, basados en el equilibrio entre las cargas externas (peso del macizo rocoso y presión del agua) y las fuerzas internas por deformación. Se establece un criterio de falla: si los desplazamientos superan un umbral crítico, la resistencia de la roca se ve afectada, indicando una posible falla progresiva. La Figura 4 muestra un ejemplo de malla típica utilizada en el análisis de taludes mediante MEF (Ashford & Sitar, 1994). Las mallas generalmente presentan elementos de tamaño uniforme, con anchos (W) y alturas (H) constantes, lo que impacta significativamente.

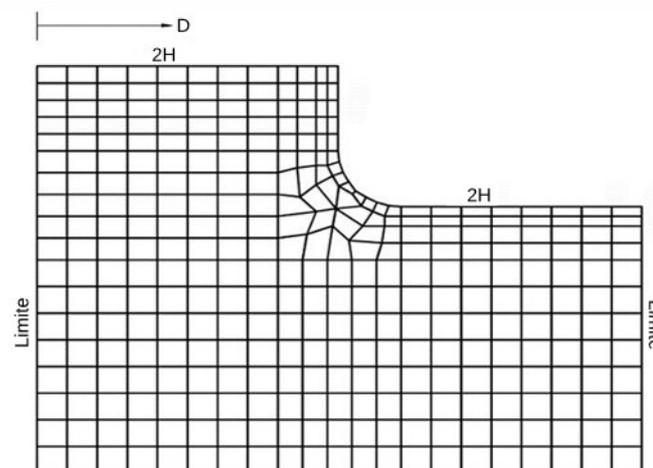


Figura 4: Malla típica para el análisis de un talud vertical por elementos finitos

3. Resultados

Los resultados de campo y de gabinete fueron evaluados en los cálculos de diseño de los parámetros geométricos y para garantizar una precisión óptima, se recurrió al software especializado Phase2 para calcular el factor de seguridad requerido. Se detallan los elementos esenciales para llevar a cabo un análisis de estabilidad del Talud Noroeste de la Mina Cuajone, tal como se ilustra en la Figura 5. La estabilidad de los taludes en la Fase 7, sector NO, se ha visto comprometida debido a la presencia de modos de ruptura complejos mixtos (Planar y Cuña aflorante), lo que ha llevado a una reducción en el ancho de la vía principal desde el óvalo de la Rampa del 3370 hasta el 3325 Sur.

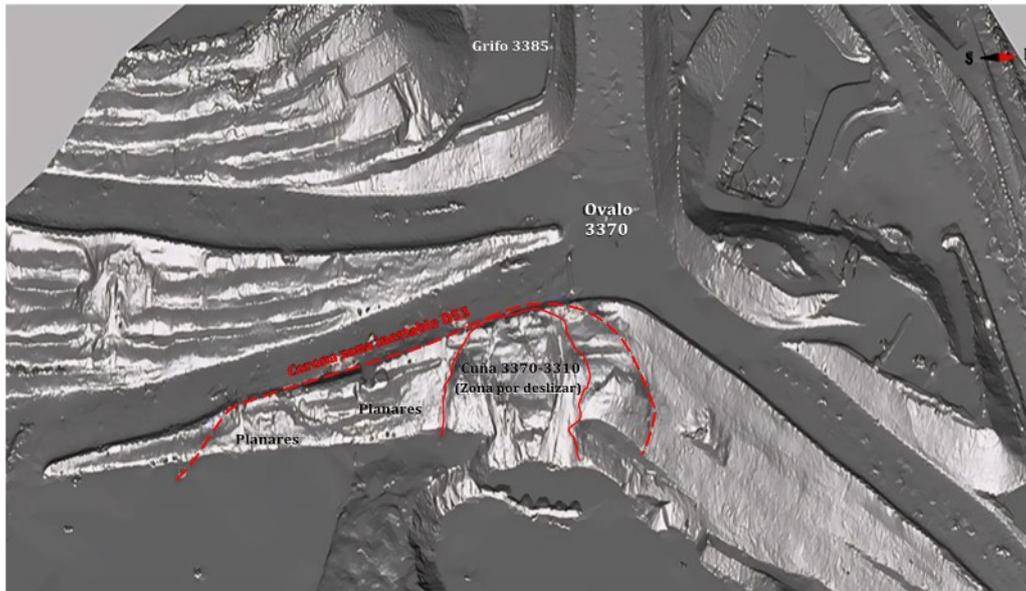


Figura 5: Topografía original (zona inestable D53)

3.1. Parámetros geomecánicos

En el área del D53, se encuentran presentes diferentes tipos de litología, que incluyen andesitas intrusivas y basálticas con alteración filítica, junto con un intrusivo de latita, que se encuentra en estado fresco y de relleno. De acuerdo con el informe "Estudio Geotécnico Plan de 15 años – Tajo Cuajone – Rev 1" elaborado por la firma consultora SRK Consulting (2016), estas formaciones litológicas están clasificadas como unidades geotécnicas básicas (UGB) 9, 6 y 1, respectivamente, como se detalla en la Tabla 2. Para estas unidades, se llevaron a cabo pruebas de mecánica de rocas y, mediante el método de ruptura de Hoek-Brown, se estimaron los parámetros correspondientes al macizo rocoso SRK Consulting (2014).

Tabla 2: Parámetros geomecánicos (SRK)

Unidad Geotécnica	Macizo Rocosó					
	GSI	mb	s	a	E (GPa)	ν
UGB1	48	0.92	0.0005	0.51	3.04	0.25
UGB6	54	1.09	0.0013	0.5	3.52	0.24
UGB9	47	0.7	0.0005	0.51	2.48	0.25

La información recopilada en campo, incluyendo los mapeos de caracterización del macizo rocoso, complementó estos parámetros. Además, se consideró el factor de perturbación por voladura (D) en el análisis, donde se asignó un valor de $D = 0.8 - 0.9$ para los macizos afectados por las voladuras, mientras que se asignó un valor de $D = 0$ para los macizos intactos.

3.2. Secciones geotécnicas

El diseño propuesto por ingeniería minera contempla la configuración de taludes con un ángulo interrampa (IRA) = 49° en el macizo regular ubicado en el lado meridional, mientras que se establece un IRA = 38° en la zona septentrional del D53, donde predominan

tanto el relleno como el macizo de baja calidad. Para llevar a cabo el análisis de estabilidad, se emplearon dos secciones. El estudio actual difiere de la propuesta de estabilización presentada por el Departamento de Ingeniería de Minas como se observa en la Figura 6. Esto se debe a que, aunque se destaca el valor del material que se va a extraer, no se están tomando en cuenta los parámetros geomecánicos ni la caracterización del macizo rocoso, tampoco se considera el factor de perturbación (D) causado por las explosiones en la zona inestable D53 del talud Noroeste de la Fase 7.

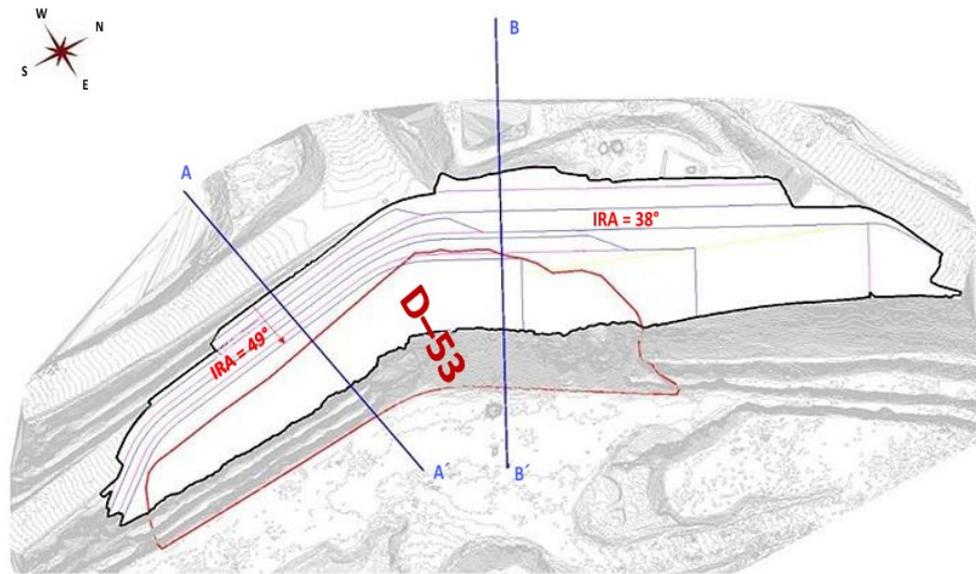


Figura 6: Vista en planta del diseño propuesto por Ingeniería Mina

La Figura 7 presenta la sección A–A' del talud sur de la zona inestable conocida como D53, presentando tanto la topografía actual como el diseño propuesto por el Departamento de Ingeniería Mina. Este diseño incluye parámetros geométricos específicos para la estabilización del D53. La propuesta sugiere la conformación de taludes con un IRA = 49°, implicando una serie de cortes y rellenos estratégicos que buscan reducir la pendiente y distribuir las tensiones de manera más uniforme. Estas medidas están diseñadas para minimizar el riesgo de futuros deslizamientos y garantizar la seguridad a largo plazo de la zona afectada. No obstante, no se considera los parámetros geomecánicos, la caracterización del macizo rocoso y tampoco el factor de perturbación por voladura (D).

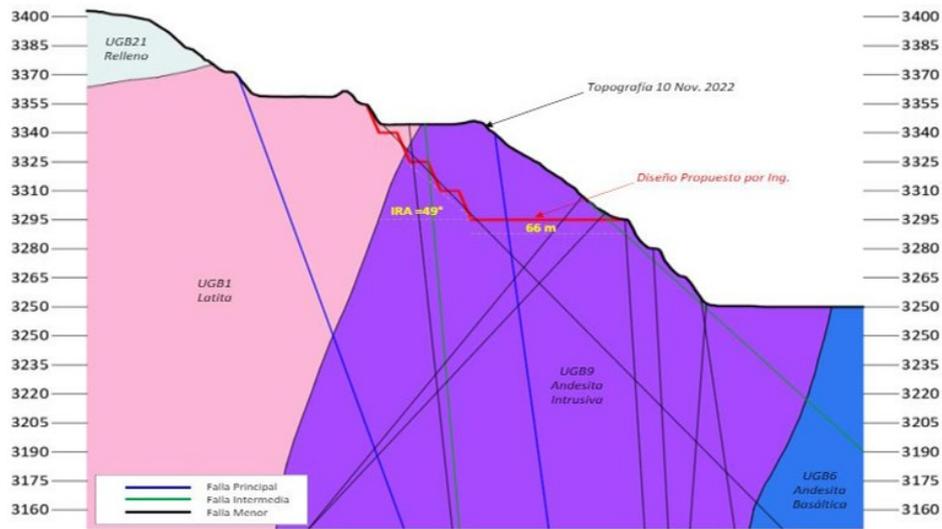


Figura 7: Sección A–A', sector sur del D53

En la Figura 8 se presenta la sección B–B' del talud norte de la zona inestable conocida como D53, mostrando tanto la topografía actual como el diseño propuesto por el Departamento de Ingeniería Mina para su estabilización. Este diseño implica la conformación de taludes con ángulos de inclinación diferenciados según la calidad del macizo rocoso. En el norte del D53, donde predominan el relleno y el macizo de baja calidad, se ha propuesto un IRA = 38°. Esta decisión se basa en la necesidad de reducir las tensiones y evitar deslizamientos en materiales menos competentes. En contraste, en la parte sur del deslizamiento, donde el macizo rocoso presenta una calidad regular, se ha establecido un IRA = 49°.

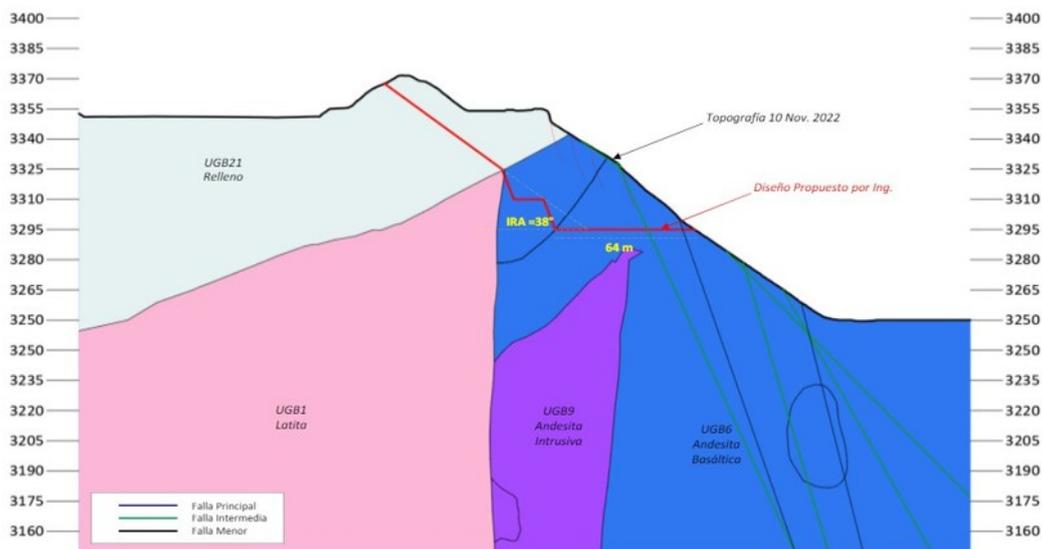


Figura 8: Sección B–B', sector norte del D53

3.3. Resultados de estabilidad

3.3.1. Sección A–A' (sector sur del D53)

La simulación evidencia rupturas y deformaciones en el macizo rocoso, a pesar de un fuerte control estructural, como se ilustra en la Figura 9. Estas deformaciones indican la

presencia de zonas de debilidad en el macizo rocoso, las cuales podrían ser puntos de inicio de fallas. Demostrando en el análisis de estabilidad en el talud sur, según el diseño propuesto por el Departamento de Ingeniería Mina, revela un $FS = 0.92$ bajo condiciones pseudoestáticas. Este valor sugiere que el talud sería inestable y pudo generar un peligro de deslizamiento en las vías del óvalo 3370 ilustrado anteriormente en la Figura 5, lo que indica la necesidad de ajustar el IRA en esta área.

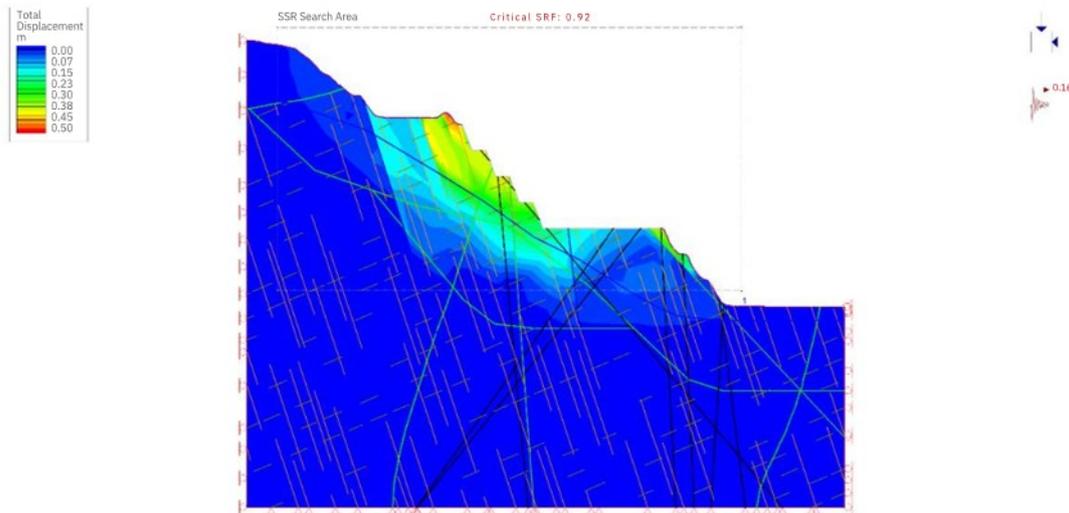


Figura 9: Sección A-A' con IRA = 49° y $FS = 0.92$

Para determinar un IRA adecuado en este sector, fue necesario realizar un análisis de sensibilidad de la ocurrencia de roturas tipo planares con respecto a la variación del IRA, como se ilustra en la Figura 10. Este análisis es fundamental para comprender cómo diferentes ángulos de inclinación afectan la estabilidad del talud y la probabilidad de fallas. Se establece que el porcentaje de ocurrencia de roturas no debe superar el 25%. Este criterio es crucial para asegurar que el diseño del talud mantenga un nivel de riesgo aceptable y que las medidas de mitigación sean efectivas. La Figura 10 muestra claramente cómo se comporta este porcentaje de ocurrencia en función de la variación del IRA.

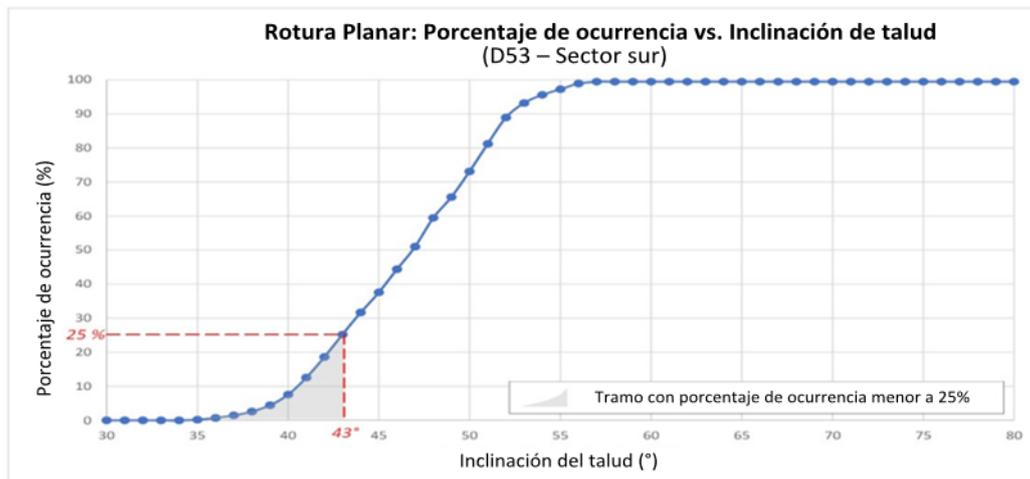


Figura 10: Análisis de sensibilidad en el sector Sur

La Figura 11 indica que el área estudiada puede tolerar hasta 43° de inclinación con un 25% de probabilidad de ocurrencia. Se llevó a cabo un análisis de estabilidad en un talud con un IRA = 43°, dándonos como resultando en un FS = 1.11 bajo condiciones pseudoestáticas, lo cual confirma la estabilidad del talud. Este análisis consideró diversas variables geotécnicas y dinámicas, como la resistencia del material rocoso, la presión de los poros y las fuerzas externas. La simulación detallada mostró cómo el talud se comporta bajo cargas pseudoestáticas, identificando las áreas de mayor resistencia y las posibles rutas de falla.

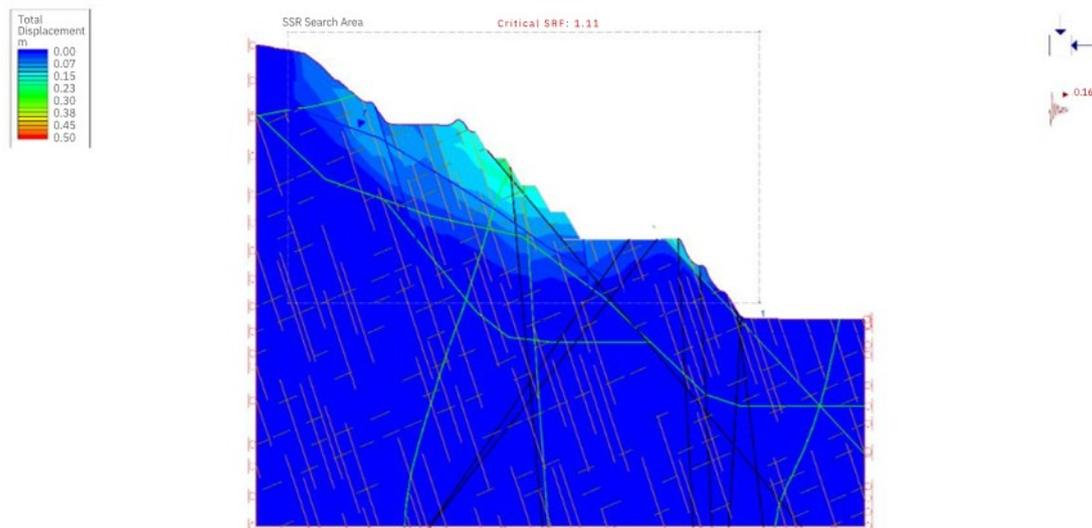


Figura 11: Sección A-A', Análisis de estabilidad talud sur propuesto con IRA = 43° con FS = 1.11, con condición estable.

3.3.2. Sección B-B' (sector norte del D53)

El análisis de estabilidad realizado en el talud norte, según el diseño propuesto por el departamento de Ingeniería Mina, revela un FS = 1.57 bajo condiciones pseudoestáticas. La construcción del talud norte con un IRA = 38° resultaría en un talud estable. La deformación ocurre principalmente en el relleno como respuesta al banqueo en la parte inferior, influyendo en cómo se distribuyen las tensiones y cómo se deforma el relleno, como se muestra en la Figura 12. Este análisis subraya la importancia de un diseño cuidadoso y de la implementación de técnicas de estabilización adecuadas para asegurar la integridad del talud.

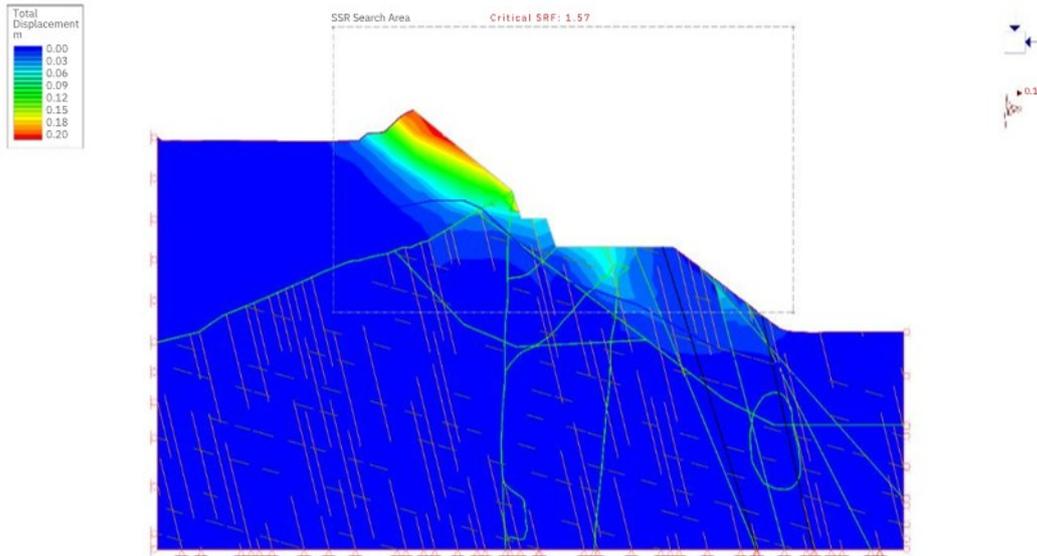


Figura 12: Sección B-B', Análisis de estabilidad talud norte con un IRA = 38° con FS = 1.57, condición estable

El análisis de sensibilidad del porcentaje de ocurrencia de rotura planar, como se muestra en la Figura 13, revela que el talud en roca puede soportar una inclinación de hasta un IRA = 41°. Este análisis es fundamental para determinar la inclinación máxima que puede manejar el talud sin comprometer su estabilidad, asegurando así un diseño seguro y eficiente. Sin embargo, es importante considerar que el sector está conformado en gran parte por relleno, lo cual cambia las condiciones de estabilidad. El material de relleno, a diferencia de la roca, tiene propiedades mecánicas diferentes y generalmente es menos estable bajo las mismas condiciones. Por lo tanto, es crucial adaptar el diseño del talud teniendo en cuenta estas diferencias para evitar riesgos de fallo.

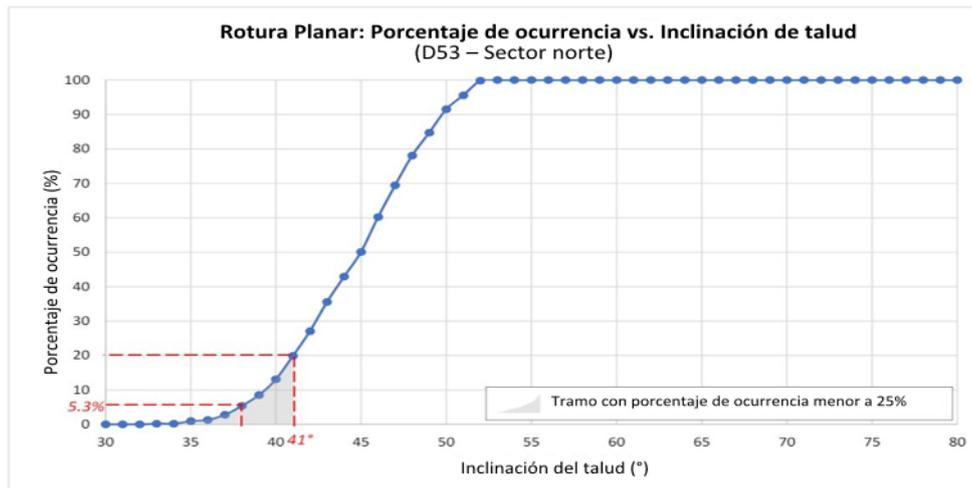


Figura 13: Análisis de sensibilidad del % de ocurrencia en el sector Norte

4. Discusión

4.1. Factor de seguridad

El análisis de estabilidad en el talud sur del diseño propuesto, realizado por Ingeniería Mina, muestra un FS = 0.92 en condiciones pseudoestáticas. Este valor indica que

las fuerzas actuantes sobre el talud superan su resistencia, sugiriendo un riesgo significativo de falla. La implementación de este diseño resultaría en un talud inestable, lo cual podría comprometer la integridad de la vía entre los óvalos 3370 y 3430. Por ello, es necesario ajustar el ángulo de inclinación en esta sección, como se detalla en la Tabla 3. Tardeo & Zanabria (2016) realizaron un análisis estático y dinámico utilizando el método de elementos finitos, determinando el factor de seguridad de taludes y concluyendo que la zona estudiada era inestable, dado que el $FS < 1$. Este precedente fundamenta los resultados obtenidos y presentados en la Tabla 3, subrayando la necesidad de modificar el diseño para mejorar la estabilidad del talud.

Tabla 3: Factor de seguridad condición inestable

Sector	Diseño Talud			Análisis de estabilidad		Ocurrencia	Condición
	IRA (°)	ACB (°)	HB (m)	Pseudoestático FS	Estático FS	Rotura Planar (%)	
Sur	49	70	15	0.92	1.33	67	Inestable

Para determinar un IRA adecuado en este sector, se realizó un análisis de sensibilidad sobre la ocurrencia de roturas tipo planar en función de la variación del IRA. Según el criterio de aceptabilidad, este porcentaje no debe superar el 25%. Los resultados indicaron que el sector Sur puede soportar hasta 43° con un 25% de ocurrencia de roturas. Un análisis de estabilidad para un talud con $IRA = 43^\circ$ mostró un $FS = 1.11$ en condiciones pseudoestáticas, indicando un talud estable. Por lo tanto, se recomienda reconfigurar el talud del sector sur con $IRA = 43^\circ$, como se detalla en la Tabla 4. Según Hoek (2007) en Practical Rock Engineering menciona que el 25% de probabilidad de falla es un criterio aceptado en estabilidad de taludes bajo ciertas condiciones, particularmente en minería. Además, Obregon & Mitri (2019) en Slope Stability Analysis Using Probabilistic and Deterministic Methods refuerzan este límite en proyectos mineros.

El análisis de estabilidad del talud norte del diseño propuesto por Ingeniería Mina muestra un $FS = 1.57$ en condiciones pseudoestáticas. La construcción del talud norte con un $IRA = 38^\circ$ resultaría en un talud estable. El análisis de sensibilidad del porcentaje de ocurrencia para rotura planar sugiere que el talud en roca puede soportar una inclinación de hasta 41° . Sin embargo, dado que el sector está conformado en gran parte por relleno, se recomienda mantener el diseño del talud con un $IRA = 38^\circ$. Estos hallazgos concuerdan con estudios previos, como el de Mnzool et al. (2013) en la Mina de Cobre Chengmenshan, que también reportó un FS similar mediante métodos de equilibrio límite y análisis por elementos finitos. Además, los sectores sur y norte presentan un $FS > 1.3$ en condiciones estáticas, lo que indica que las fuerzas sobre el talud son menores que su resistencia, sugiriendo estabilidad y ausencia de riesgo de falla. Por lo tanto, el talud se considera seguro y no presenta riesgos significativos de falla, ilustrado en la Tabla 4. Herrera (2020) señala que el FS disminuye en análisis anisotrópicos, encontrando una correlación positiva entre la calidad del macizo rocoso y la reducción del FS anisotrópico respecto al isotrópico, lo que refuerza la importancia de utilizar múltiples métodos para una evaluación precisa de la estabilidad del talud.

Tabla 4: Factor de seguridad condición estable

Sector	Diseño Talud			Análisis de estabilidad		Ocurrencia	Condición
	IRA (°)	ACB (°)	HB (m)	Pseudoestático FS	Estático FS	Rotura Planar (%)	
Sur	49	70	15	1.1	1.62	25	Estable
Norte	38	38	15	1.57	2.11	5.3	Estable

4.2. Factor de perturbación “D”

Para el análisis de estabilidad del talud Noreste de la Fase 7 del Tajo Cuajone, se han incorporado características específicas basadas en la experiencia y el conocimiento del terreno. El factor D, asociado a la perturbación del talud por daños de voladura, fue crucial en los cálculos de estabilidad. Este valor y su perímetro de influencia fueron determinados mediante observaciones de campo. La técnica de mitigación del daño por voladura es novedosa en la minería nacional, tradicionalmente usada para proteger estructuras cercanas a áreas urbanas. Actualmente, se emplean técnicas avanzadas como la voladura de Pre-corte y los taladros de buffer, que disponen columnas de explosivos de menor altura y con un espaciamiento reducido. Además, el uso de detonadores electrónicos permite un riguroso control de la secuencia, dirección y tiempo de las detonaciones, mejorando el control de vibraciones y reduciendo daños.

Estas metodologías han mejorado significativamente la estabilidad de los taludes, permitiendo reconfigurar ángulos interrampa más agresivos. La Figura 15 ilustra la zonificación referencial de taladros, destacando el menor espaciamiento en los taladros de buffer, que tienen una menor altura de carga de explosivo para un mejor control de vibraciones hacia el talud final (Elaborado por Perforación y Disparos SPCC).

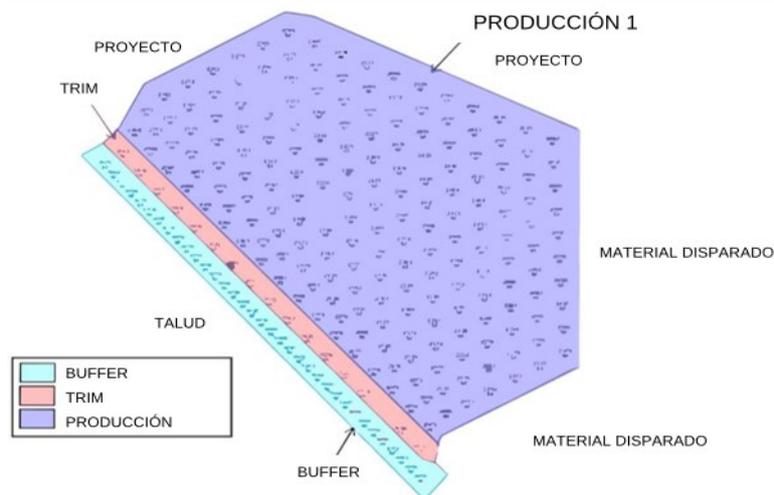


Figura 15: Zonificación referencial de taladros

Es importante señalar que este método representa una aproximación indirecta, aunque una posible alternativa sería llevar a cabo perforaciones y compararlas con sondajes anteriores en la zona para observar directamente los efectos del daño inducido por la voladura. El valor D resultante desempeña un papel crucial en el análisis de estabilidad de los taludes y se refleja en el Factor de Seguridad, por lo que debe ser tratado con la misma atención y

delicadeza que la caracterización del macizo rocoso y el mapeo estructural. La técnica de voladura de pre-corte y taladros de buffer ha sido destacada por varios estudios, como el de Jiménez (2018), quienes encontraron que estas técnicas son efectivas para reducir los daños por voladura y mejorar la estabilidad de los taludes. Estos métodos son esenciales para controlar las vibraciones y minimizar el daño al macizo rocoso, asegurando así una mayor estabilidad del talud.

5. Conclusiones

El análisis detallado de estabilidad del talud sur en la Mina Cuajone, utilizando métodos estáticos y pseudoestáticos, ha permitido identificar un riesgo significativo de falla con un factor de seguridad (FS) de 0.92 en su estado original. Mediante la optimización del ángulo de inclinación a 43° , se logró incrementar el FS a 1.11, garantizando así la estabilidad del talud. Este hallazgo no solo mejora la seguridad operativa, sino que también proporciona una base sólida para futuras investigaciones que busquen desarrollar estrategias de diseño más seguras y eficientes para taludes en minas con condiciones geotécnicas similares.

En el análisis del talud norte, se determinó que un FS de 1.57 en condiciones pseudoestáticas con un ángulo de inclinación de 38° es adecuado para garantizar la estabilidad. Sin embargo, la investigación destacó que las propiedades del material de relleno, en contraste con la roca, juegan un papel crucial en la estabilidad del talud. Mantener el ángulo de 38° en lugar de aumentarlo a 41° es esencial para prevenir posibles fallas. Estos resultados subrayan la necesidad de realizar estudios geotécnicos específicos del sitio y proponen una línea de investigación futura centrada en la caracterización y modelación del comportamiento de los materiales de relleno en la estabilidad de taludes mineros.

Los análisis realizados sugieren varias modificaciones en el diseño de los taludes para mejorar la seguridad operativa en la Mina Cuajone. La incorporación de ángulos de inclinación optimizados y la evaluación precisa de las propiedades del material de relleno son esenciales para minimizar los riesgos de falla. Futuros estudios podrían enfocarse en explorar el impacto de diferentes técnicas de voladura en la estabilidad del talud y en la integración de tecnologías avanzadas, como el monitoreo en tiempo real y el modelado 3D, para evaluar y mejorar la estabilidad de los taludes de manera dinámica. Estas investigaciones contribuirán a desarrollar prácticas mineras más seguras y sostenibles.

Contribuciones de los autores

En concordancia con la taxonomía establecida internacionalmente para la asignación de créditos a autores de artículos científicos (<https://casrai.org/credit/>). Los autores declaran sus contribuciones en la siguiente matriz:

	Catari, P.	Barriga, C.	Villanueva, C.	Gomez, J.	Alvarado, H.	Melgar, D.	Chirinos, E.
Conceptualización							
Análisis formal							
Investigación							
Metodología							
Recursos							
Validación							
Redacción – revisión y edición							

Conflicto de Interés

Los autores declaran que no existen conflictos de interés de naturaleza alguna con la presente investigación.

Referencias

Abdellah, W. R., Hirohama, C., Sainoki, A., Towfeek A. R., & Ali, M. A. M. (2022). Estimating the Optimal slope angle of open-pit mines: probabilistic analysis. *Applied Sciences*, 12(9), 4746. <https://doi.org/10.3390/app12094746>

Ancuța, R., Bejan, F., & Almohamad, D. (2022). Sustainable Slope Stability Analysis: A Critical Study on Methods. *Sustainability*, 14(14), 8847. <https://doi.org/10.3390/su14148847>

Ashford, S. A. & Sitar, N. (1994). *Seismic Response of Steep Natural Slopes*. Earthquake Engineering Research Center.

Bar, N., Yacoub, T., & McQuillan, A. (2019). Analysis of a large open pit mine in Western Australia using finite element and limit equilibrium methods. In: *Proceedings of 53rd U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*, New York City, New York.

Cervera, L. (2022). *Método de elementos finitos: Estabilidad de taludes*. <https://eadic.com/blog/entrada/el-metodo-de-elementos-finitos-estabilidad-de-taludes/>.

Gagliuffi, P. & Vera, M. (2018). Caracterización petromineralógica de los yacimientos Toquepala y Cuajone. *INGEMMET, Boletín Serie B: Geología Económica*, 49, 206 p. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/1521>

Gonzales, L., Ferrer, M., Ortaño, L., & Oteo, C. (2004). *Ingeniería Geológica*. Pearson Educación. https://www.academia.edu/50773034/INGENIERIA_GEOLOGICA_GONZALES_DE_VALLEJO

Herrera, E. (2020). *Caracterización geomecánica del macizo rocoso aplicado al análisis de estabilidad de taludes en el yacimiento Jesica Ocuvi - Lampa - Puno - 2015 – 2016* [Tesis de maestría, Universidad Nacional Mayor de San Marcos].

Hoek, E. (2007). *Practical Rock Engineering*. Rocscience. <https://amser.org/g6219/f4>

Jaeger, J. C., Cook, N. G. W., & Zimmerman, R. W. (2007). *Fundamentals of Rock Mechanics*. Blackwell Publishing.

- Jiménez, S. P. (2018). Impacto ambiental de la Compañía minera Southern Perú Cooper Corporation en América Latina: Una aproximación histórica de comienzos del siglo XX a la actualidad. *Revista Geográfica de América Central*, 61(3), 489-503. <http://dx.doi.org/10.15359/rgac.61-3.25>
- Kang, J., Wan, D., Sheng, Q., Fu, X., Pang, X., Xia, L., & Li, D. (2022). Risk assessment and support design optimization of a high slope in an open pit mine using the jointed finite element method and discontinuous deformation analysis. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 81(6). <https://doi.org/10.1007/s10064-022-02759-z>
- Mnzool, M., Wan, L. & Wei, Z. (2013). Stability analysis of southern slope of Chenmenshan open pit copper mine. *Current Research in Geoscience*, 3(1), 13–22. <https://doi.org/10.3844/ajgsp.2013.13.22>
- Obregon, C., & Mitri, H. (2019). *Slope Stability Analysis Using Probabilistic and Deterministic Methods*. *International Journal of Mining Science and Technology*, 29(3), 471-479. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2019.06.017>
- Rocscience Inc. (2012). Dips V.7.0. Graphical and Statistical Analysis Software for Orientation Data. <https://www.rocscience.com/software/dips>.
- Rocscience Inc. (2016). Phase2 V.8.0. <https://www.rocscience.com/software/phase2>.
- SRK Consulting. (2014). Estimación de Propiedades del Macizo Rocoso para la Mina Cuajone, Perú. Informe preparado para Southern Perú Copper Corporation, Perú.
- SRK Consulting. (2016). Estudio geotécnico plan de 15 años – Tajo Cuajone (Rev. 1). Informe preparado para Southern Perú Copper Corporation, Perú.
- Suárez, J. (2009). *Deslizamientos. Análisis geotécnico*. Industrial de Santander.
- Tardeo, C., & Zanabria, E. (2016). *Análisis dinámico de estabilidad de taludes en Huayllapampa del Distrito de Cuenca Huancavelica* [Tesis de grado, Universidad Nacional de Huancavelica]. <http://repositorio.unh.edu.pe/handle/UNH/1935>
- Wang, Z., & Lin, M. (2021). Finite element analysis method of slope stability based on fuzzy statistics. *Earth Sciences Research Journal*, 25(1), 123–130. <https://doi.org/10.15446/esrj.v25n1.93320>
- Zhao, X., Zhao, Y., & Yu, W. (2023). The safety factor of a heterogeneous slope in an open-pit metal mine: A case study from the Tanjianshan gold mine. *Frontiers in Earth Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.990454>